

**ЕНЕРГОСБЕРЕЖЕНИЕ****УДК 621.317****Сотнік Ольга Василівна**, канд. техн. наук, доцентХарківський національний технічний університет сільського господарства імені Петра Василенка, м. Харків, Україна, вул. *Артема*, 44, м. Харків, Україна, 61002, (097) 466-42-57, [o.sotnik@list.ru](mailto:o.sotnik@list.ru)**ДОСЛІДЖЕННЯ ВТРАТ ЕЛЕКТРОЕНЕРГІЇ В МЕРЕЖАХ СІЛЬСЬКИХ НАСЕЛЕНИХ ПУНКТИВ В УМОВАХ ВІДХИЛЕННЯ НАПРУГИ**

*Показано, що при застосуванні технічних заходів для підтримки рівня напруги, а саме регулювання кількості витків на високій стороні розподільного трансформатора, змінюються параметри трансформатора, що викликає зміну та утворення додаткових втрат електроенергії в даних мережах.*

**Ключові слова:** сільські електричні мережі комунально-побутового призначення, відхилення рівня напруги, силовий розподільний трансформатор, коефіцієнт трансформації, втрати електричної енергії.

**Сотник Ольга Васильевна**, канд. техн. наук, доцентХарьковский национальный технический университет сельского хозяйства имени Петра Василенко, г. Харьков, Украина, ул. *Артема*, 44, г. Харьков, Украина, 61002, (097) 466-42-57, [o.sotnik@list.ru](mailto:o.sotnik@list.ru)**ИССЛЕДОВАНИЕ ПОТЕРЬ ЭЛЕКТРОЭНЕРГИИ В СЕТЯХ СЕЛЬСКИХ НАСЕЛЕННЫХ ПУНКТОВ В УСЛОВИЯХ ОТКЛОНЕНИЯ НАПРЯЖЕНИЯ**

*Показано, что при применении технических мероприятий для поддержания уровня напряжения, а именно регулирования количества витков на высокой стороне распределительного трансформатора, изменяются параметры трансформатора, что вызывает изменение и образования дополнительных потерь электроэнергии в данных сетях.*

**Ключевые слова:** сельские электрические сети коммунально-бытового назначения, отклонения уровня напряжения, силовой распределительный трансформатор, коэффициент трансформации, потери электрической энергии.

**Olga Sotnik**, Candidate of Technical Sciens, Associate ProfessorKharkiv National Technical University of Agriculture named Petro Vasilenko, Kharkiv, Ukraine, Artem, 44, Kharkiv, Ukraine, 61002, (097) 466-42-57, [o.sotnik@list.ru](mailto:o.sotnik@list.ru)**DISCOVERING ENERGY LOSSES IN NETWORK OF RURAL SETTLEMENTS UNDER VOLTAGE REJECTION**

*In applications of technical measures to maintain the level of voltage, such as adjusting the number of turns on the high side of the distribution transformer, changing transformer parameters change that causes a change in the formation of additional power losses in these networks.*

**Key word:** rural electric networks, deviation of voltage power distribution transformer, losses of electricity.

**Постановка проблеми**

Сучасний стан вітчизняної електроенергетики такий, що споживачі не завжди забезпечені надійним електропостачанням та якісною електроенергією. Особливо це стосується сільських споживачів, де відхилення напруги на затискачах електроприймачів у 3-4 рази можуть перевищувати допустимі значення, а тривалість споживання неякісної енергії складає близько 45 % від загального часу роботи [1]. В Україні майже 50 % всієї електроенергії використаної споживачами в сільському господарстві витрачається в житловому секторі і сфері культурно-побутового обслуговування населення. Споживання електроенергії у комунально-побутовому секторі села зростає з кожним роком. Тому, гостро постає проблема дослідження втрат електроенергії та покращення її якості в сільських мережах комунально-побутового призначення [1–4].

**Аналіз останніх досліджень**

На даний час опублікована значна кількість праць з питань електронавантаження та аналізу режимів навантаження енергосистем, але для сільських мереж комунально-побутового призначення дані питання недостатньо відображені в науково-технічній літературі [1–3]. Зміни величини та якості сільського комунально-побутового

електронавантаження потребують перегляду існуючих положень, як в теорії розрахунку і проектування сільських мереж, так і в питаннях оптимізації експлуатаційних рішень.

### Формулювання мети статті

Дослідження втрат потужності при її передачі по сільським комунально-побутовим мережам та знаходження простих способів для зменшення даного виду втрат.

### Основна частина

Вплив якості електроенергії на роботу електроприймачів визначається рядом факторів [5]. Електричні мережі 0,4 кВ є останньою ділянкою при передачі і розподілу електроенергії від електростанції до споживачів. Від надійності роботи даних мереж та їх завантаження залежать надійність, якість і економічність електропостачання споживачів. Показники якості електроенергії в Україні регламентує Держстандарт. Одним із основних показників якості електроенергії є величина напруги та її відхилення від номінального значення. Відхилення напруги від номінального значення відбувається через: добові сезонні та технологічні зміни електронавантажень споживачів; зміну потужності компенсуючих пристроїв; регулювання напруги генераторами електростанцій і на підстанціях енергосистем; зміну схеми та параметрів електромережі.

Зміна напруги відбивається на роботі різних видів електроприймачів, найбільш чутливою є радіоапаратура. Так, від'ємне відхилення напруги погіршує зображення телевізорів, додатне – скорочує термін служби [5]. Дуже чутливі до зміни напруги конденсатори, їх потужність залежить від квадрату напруги. Таким чином, при зниженні напруги до  $0,9 U_n$ , потужність конденсатора понижується до 81 %. Підвищення напруги призводить до збільшення реактивної потужності конденсатора, а, отже, викликає його перевантаження. При частих перевищеннях напруги за номінальну, спостерігається масовий вихід із ладу конденсаторів. З іншого боку, високу чутливість до зміни напруги мають і освітлювальні прилади. Із зниженням напруги найбільш помітно падає світловий потік. Так, при  $0,95 U_n$  світловий потік зменшується на 18 %, а вже при  $0,9 U_n$  – більше ніж на 30 %. При підвищенні напруги за номінальну різко зменшується термін служби ламп: при  $1,1 U_n$  – термін служби ламп зменшується втричі. При підвищенні напруги світлова віддача люмінесцентних ламп на відміну від ламп розжарювання зменшується, а при зменшенні напруги навпаки збільшується. Відхилення напруги негативно впливає на якість роботи і термін служби і іншої побутової техніки.

Проблема якості електроенергії тісно пов'язана з її втратами, оскільки причини, які призводять до погіршення її якості призводять також і до збільшення втрат, а це, в свою чергу, викликає відповідний збиток. Між тим, втрати потужності і якість електроенергії визначають пропускну спроможність мереж. Тому, всі заходи зі зниження втрат електроенергії і стабілізації параметрів напруги направлені на підвищення пропускну спроможності електричних мереж [2, 5].

Однією з найбільш поширених проблем якості у роботі електричних мереж 0,4 кВ – є проблема зі зниженою напругою у найбільш віддалених споживачів. Для рішення даної проблеми можна здійснити заходи для підвищення якості електроенергії та зменшення втрат при експлуатації мереж. Існують способи, які дозволяють покращити якість електроенергії у проблемних споживачів шляхом зміни: ЕРС джерела живлення; потужності трансформатора і (чи) його коефіцієнта трансформації; опору лінії живлення; схеми приєднання навантаження (реконструкція схеми) [6–8].

Для підтримки рівня напруги у споживача передбачено регулювання коефіцієнта трансформації силового трансформатора за допомогою перемикача напруги у межах  $\pm 5 \%$ . Параметри трансформатора, для яких визначаються втрати, як у живлячій, так і у мережі, що живиться надаються при номінальному режимі, тобто, при номінальному коефіцієнті трансформації. Втрати енергії у силовому трансформаторі зазвичай поділяють на дві частини і визначаються виразом [8]:

$$\Delta W = \Delta W_{xx} + \Delta W_{hb} = \Delta P_{xx} T + \Delta P_{k3} \left( \frac{S_{max}}{S_{ном}} \right)^2 \tau, \quad (1)$$

де  $T$  – час роботи трансформатора;

$\tau$  – час максимальних втрат.

В мережі, для компенсації втрати напруги на опір в лініях, приходиться збільшувати номінальну напругу, для чого зменшується коефіцієнт трансформації силового трансформатора шляхом зменшення числа витків первинної обмотки. У даному випадку виникає зміна втрат потужності як в лініях 10 кВ і 0,4 кВ, так і в обмотках і в магнітопроводі трансформатора.

Відповідно до [8, 9] втрати потужності холостого ходу в силовому трансформаторі визначаються з урахуванням прикладеної напруги на основі наведених у паспорті трансформатора втрат потужності  $\Delta P_{xx}$  та визначаються за формулою:

$$\Delta W_{xx} = \Delta P_{xx} \sum_{i=1}^m T p_i \left( \frac{U_i}{U_{ном}} \right)^2, \quad (2)$$

де  $T p_i$  – число часів роботи в  $i$  – тому режимі;

$U_i$  – напруга в  $i$  – тому режимі;

$U_{ном}$  – номінальна напруга трансформатора.

Якщо  $U_i = U_{ном}$ , то  $\Delta W_{xx} = \Delta P_{xx} \cdot T_{роб}$ . Однак, якщо положення перемикача напруги має положення  $\pm 5\%$ , то розрахунок втрат за номінальними параметрами призводить до значних похибок через те, що втрати в трансформаторі і мережі змінюються у порівнянні з номінальним режимом, а це в свою чергу призводить і до того, що:

1. Змінюються втрати холостого ходу у трансформатора, так як змінилась кількість витків первинної обмотки на 5 % при тому як підведена напруга в обмотці вищої напруги залишилася незмінною. Через це на 5 % зміниться значення магнітної індукції в осерді трансформатора. Можна вважати, що збільшення втрат у електротехнічній сталі пропорційно квадрату збільшення індукції, тоді при зменшенні на 5 % числа витків [8, 9]:

$$\Delta P_{xx}^{+0,05} = \Delta P_{xx, ном} \left( \frac{B^{+0,05}}{B_{ном}} \right)^2 = \Delta P_{xx, ном} \left( \frac{1,05 \cdot B_{ном}}{B_{ном}} \right)^2 = 1,05^2 \Delta P_{xx, ном}. \quad (3)$$

2. Змінюються також навантажувальні втрати у обмотках трансформатора.

Номінальний коефіцієнт трансформації трансформатора  $K_n = \frac{W_1}{W_2}$ . При зміні кількості витків первинної обмотки поточний коефіцієнт трансформації:

$$K = \frac{W_1 \pm \Delta W_1}{W_2} = K_n (1 \pm \beta), \quad (4)$$

де  $\beta = \frac{\Delta W_1}{W_1}$  – відносне збільшення числа витків обмотки  $W_1$ .

Навантажувальні втрати в обмотках трансформатора при номінальному коефіцієнті трансформації визначаються виразом:

$$\Delta P_{k3} = I_1^2 (r_1 + K_n^2 r_2), \quad (5)$$

де  $r_1$  і  $r_2$  – активні опори первинної та вторинної обмоток;

$$I_1 = \frac{U}{Z_1} + K^2 (Z_2 + Z_{\text{нв}}) - \text{первинний струм навантаження};$$

$Z_1, Z_2$  – повні опори обмоток трансформатора.

При перемикаванні числа витків первинної обмотки для зміни коефіцієнта трансформації змінюються приведені значення опорів вторинної обмотки  $Z_2$  і навантаження трансформатора  $Z_{\text{нв}}$ . Змінюється також активний опір  $r_1$  і повний опір  $Z_1$  первинної обмотки. Якщо зміна параметрів первинної обмотки пропорційна зміні числа витків, то величину навантажувальних втрат після перемикавання можна визначити за виразом:

$$\Delta P'_{\text{кз}} = \frac{U^2 [r_1 (1 \pm \beta) + K^2 r_2 (1 \pm \beta)^2]}{[Z_1 (1 \pm \beta) + K^2 (Z_2 + Z_{\text{нв}}) (1 \pm \beta)^2]^2}. \quad (6)$$

При припущенні  $Z_1 + K^2 Z_2 \ll K^2 Z_{\text{нв}}$  для величини навантажувальних втрат буде:

$$\Delta P'_{\text{кз}} = \frac{U^2 [r_1 + K^2 r_2 (1 \pm \beta)]}{K^4 Z_{\text{нв}}^2 (1 \pm \beta)^3} = I_1^2 \left[ \frac{r_1}{(1 \pm \beta)^3} + \frac{K^2 r_2}{(1 \pm \beta)^2} \right]. \quad (7)$$

Так як для силових трансформаторів прийнято вважати  $r_1 \approx K^2 r_2 = 0,5 r_{\text{тр}}$ , то отримаємо:

$$\Delta P'_{\text{кз}} = \frac{I_1^2 r_{\text{тр}}}{2} \frac{2 \pm \beta}{(1 \pm \beta)^3} = \Delta P_{\text{кз}} \frac{2 \pm \beta}{2(1 \pm \beta)^2}, \quad (8)$$

де  $\frac{2 \pm \beta}{2(1 \pm \beta)^2}$  – показує ступень зміни навантажувальних втрат трансформатора при зміні його коефіцієнта трансформації.

Таким чином, розрахунок навантажувальних втрат силового трансформатора з урахуванням зміни коефіцієнта трансформації можна звести до формули:

$$\Delta P'_{\text{кз}} = \Delta P_{\text{кз}} \frac{2 \pm \beta}{(1 \pm \beta)^2} \left( \frac{S_{\text{нв}}}{S_{\text{ном}}} \right)^2 K_{\text{кзпер}}, \quad (9)$$

де  $K_{\text{кзпер}}$  – коефіцієнт зміни коефіцієнта трансформації (у межах  $\pm 5\%$ ).

Проведений аналіз показав, що перемиканні коефіцієнта трансформації у межах  $\pm 5\%$  втрати в обмотках трансформатора змінюються на 12–14 %.

Також зміна коефіцієнта трансформації призводить до зміни втрат у розподільній мережі. Збільшення номінальної напруги призводить до нерозрахункового збільшення споживання електроенергії.

### Висновок

При відхиленні від Держстандарту у споживачів електроенергії величини вхідної напруги, використання технічних заходів для підтримки напруги призводить до збільшення

втрат: у силовому трансформаторі, в лінії 0,4 кВ, у споживачів, які знаходяться біля силового трансформатора. Тому, застосування вольтододаткових автотрансформаторів, застосування додаткової лінії або живлення сільських комунально-побутових споживачів від лінії вищої напруги через окремі трансформатори забезпечили б покращення якості у даного виду споживачів та зменшення втрат електроенергії у даних мережах.

#### Список використаної літератури:

1. Сотнік О. В. Тенденції розвитку сільського побутового електроспоживання / О. В. Сотнік, О. В. Лугова, В. Д. Стрижак // Наукові праці Кременчуцького державного політехнічного університету. Вісник КДПУ – Кременчук: КДПУ, 2005. – Вип. 6/2005 (35). – С. 23–26.
2. Сотнік О. В. Питання прогнозування побутового електронавантаження / О. В. Сотнік // Вісник ХНТУСГ ім. Петра Василенка, “Проблеми енергозабезпечення та енергозбереження в АПК України” – Харків: ХНТУСГ, 2007. – Вип. 57. – Т. 1. – С. 165–169.
3. Дерзкий В. Г. Потребление электроэнергии населением / В. Г. Дерзкий, В. Ф. Скиба // Электрические сети и системы. К.: – 2008. – № 3. – С. 12–17.
4. Дерзкий В. Г. Выбор мероприятий по снижению потерь электроэнергии в распределительных сетях. / В. Г. Дерзкий, В. Ф. Скиба // Энергосбережение · Энергетика · Энергоаудит, № 6, 2009. – С. 20–21.
5. Автоматизовані системи обліку та якості електричної енергії в оптовому ринку / [Праховник А. В., Тесик Ю. Ф., Жаркін А. Ф. і др.]; під ред. О. Г. Гриба – Харків: ПП «Ранок-НТ», 2012. – 516 с.
6. Conservation voltage reduction: estimating methodology for large regional application. De Steese J. G., Kennedy B. W., Merrick S. B. // Proc.Amer.Power Conf., Vol. 54, Pt. 1, 54th Annu.Meet. Amer. Power Conf., Chicago, 1992. – P. 625–632.
7. Rural power quality / Kaval D. O. et al // IEEE. Trans Ind. Application. – 1992. № 4. – P. 761–766.
8. Имшенецкий В. Н. Сельские электрические сети / В. Н. Имшенецкий, С. М. Рожавский. – М.: Колос, 1970. – 392 с.
9. Богдан А. В., Способ повышения качества электроэнергии в линии распределительной сети 0,4 кВ / А. В. Богдан, В. В. Папуков, В. В. Савиных // Энергосберегающие технологии, оборудование и источники питания для АПК: сб.науч.трудов / КубГАУ. – 2006. – Вып. № 421 (151).

#### Referenses:

1. Sotnik O. V. Lughova O.V. Stryzhak V. D., (2005) Trends in the rural household power consumption. Proceedings of the Kremenchug State Polytechnic University, [Tendentsii rozvytku silskogo electrosposzhuvannya] - No. 6/2005 (35), P. 23–26.
2. Sotnik O. V., (2007) Household electricity load forecasting Questions. KHNTUA Peter Vasilenko, "The problems of energy supply and energy efficiency in agriculture of Ukraine", [Pytannya prognosuvannya pobutovogo elektropotrebleniya] No. 57, P. 165–169.
3. Derskiy V. G. Skiba V. F., (2008) Electricity consumption population. Electrical networks and systems, [Potreblenie elektroenergii naseleniem] No. 3, P. 12–17.
4. Derskiy V. G. Skiba V. F., (2009) Selection measures for reduction of energy losses in distribution networks. Energysaving. Energy. Energy audit, [Vybor meropriyatiy po snizheniyu poter elektroenergii v raspredelitelnykh setyakh] No. 6, P. 20–21.
5. Prakhovnik A. V. Tesyk Y. F. Zharkin A. F., (2012) Automated systems of accounting and quality of electricity in the wholesale market, [Avtomatyzovani systemy obliku ta yakosti elektroenergii v optovomu rynku] p. 516.
6. Conservation voltage reduction: estimating methodology for large regional application. De Steese J. G., Kennedy B. W., Merrick S. B. // Proc.Amer.Power Conf., Vol. 54, Pt. 1, 54th Annu.Meet. Amer. Power Conf., Chicago, 1992. – P. 625–632.
7. Rural power quality / Kaval D. O. et al // IEEE. Trans Ind. Application. – 1992. № 4. – P. 761–766.
8. Imshenetskiy V. N. Rozhavskiy S. M., (1970) Rural Electric Networks, [Silskie elektricheskie seti] p. 392.
9. Bogdan O. V., (2006) Method for improving the power quality in the line of 0.4 kV distribution network, [Sposob povysheniya kachestva elektroenergii v raspredelitelnykh setyakh 0.4kV] No. 421 (151).

Поступила в редакцию 28.10 2014 г.